



Евгений Бурнаев

д.ф.-м.н., профессор РАН
Вице-президент по развитию ИИ
Директор Центра ИИ

ИНЖЕНЕРНЫЙ ИИ

в задачах проектирования

Система генеративного проектирования: образ будущего

Проект Сколтеха

Новая процессная модель

- Инженер не «внутри», а «над» системой
- Компьютер моделирует множество систем и множество сценариев
- Инструменты LLM создают и актуализируют графы знаний из слабоструктурированных источников информации
- Ручная разработка проектов → формирование целостной цифровой модели
- Оркестратор связывает отдельные системы для бесшовного решения задач проектирования



Генеративное проектирование в строительстве

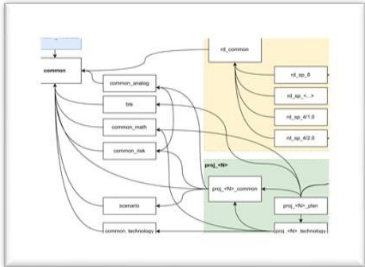
Проект «Автопроектирование»

Внешние системы

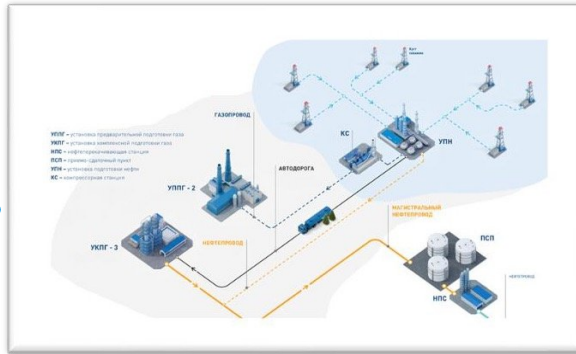
Блок управления требованиями
Управление требованиями/База знаний



Модуль Базы знаний
Онтологическая модель База БТР



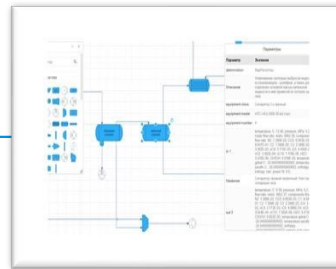
Автопроектирование
Рабочая зона по формированию
концептов площадочных объектов



Модуль описания
онтологии
Создание
онтологической

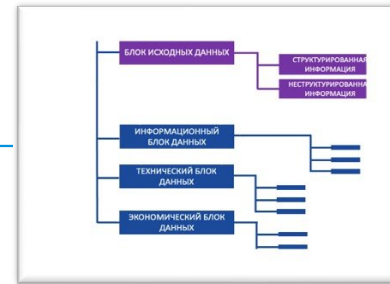


Модуль расчета
технологической схемы
Создание технологических
схем
Подбор оборудования



Модуль комплексной модели
объектов обустройства (КМО)

Интегрированный набор
цифровых данных по проекту



Модуль
автоматизированного
формирования генплана
Генерация генплана
Подбор объектов



ПЛАНИРУЕМЫЙ РЕЗУЛЬТАТ

- » Титульный список объектов капитального строительства
- » Параметры объектов капитального строительства
- » Генеральный план площадочных объектов
- » Технологические схемы
- » Расчеты капитальных затрат
- » Комплексная модель объекта обустройства
- » 3D модель генплана

КЛЮЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ
ГИПОТЕЗЫ

- » Онтологические модели
- » Большие языковые модели (LLM)
- » Генеративное проектирование

Вызовы перевода требований в машиночитаемый вид

Мультимодальные данные

- Неструктурированная информация
- Текст
- Графика
- 3D-модели

Особенности естественного языка

- Неоднозначные требования
- Сложные речевые обороты
- Множество синонимов и омонимов

Разнородные требования

- Функциональные
- Нормативные
- Технологические
- Стоимостные

Разнородные элементы

- Несущие конструкции
- Механические соединения
- Электроника, сенсоры

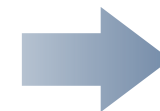
Пример 1. СП 59.13330.2020 «Доступность зданий и сооружений для маломобильных групп населения». Комплексные условия

Информирующие тактильные таблички (в том числе тактильно-звуковые) для идентификации помещений с использованием рельефно-линейного шрифта, а также рельефно-точечного шрифта Брайля для людей с нарушением зрения должны размещаться рядом с дверью со стороны дверной ручки на высоте от 1,2 до 1,6 м от уровня пола и на расстоянии 0,1 м от края таблички до края дверного проема:

- *перед входами во внутренние помещения, в которых оказываются услуги, с указанием назначения помещения;*
- *перед входами в универсальные кабины уборных и блоки общественных уборных (6.3.6);*
- *рядом с устройствами вызова помощи, в том числе в универсальных и доступных кабинках.*

Пример 2. Правила ЕЭК ООН №51-02 «О безопасности колесных транспортных средств». Условия со ссылками на параметры объекта и формулы

*Для типов транспортных средств, указанных в пункте 6.2.2.1.1, оснащенных коробкой передач, имеющей более четырех передач переднего хода, и **двигателем максимальной мощностью более 140 кВт** ЕЭК, и со-отношением **максимальной мощности/максимальной массы более 75 кВт/т**, предельные значения увеличиваются на 1 дБ (А), если скорость, на которой задняя часть транспортного средства пересекает линию ВВ' на третьей передаче, превышает 61 км/ч.*



Ручной перевод требований в машиночитаемый вид крайне трудозатратен и не масштабируем

Проверка требований вручную создает риски неоднозначных выводов и ошибок

Требования имеют сложную структуру (условия, многоуровневые требования, синонимы, омонимы и т.п.) и не могут храниться в таблицах и SQL базах данных



Необходимы новые инструменты для управления требованиями на основе ГенИИ и графовых баз данных

Блок управления требованиями

Проект Сколтех

ВВОД ДАННЫХ

ОБРАБОТКА

ВЕРИФИКАЦИЯ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

стремление к автоматизации процессов

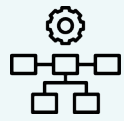


заведение данных
в виде текстовых
документов:

нормативные
документы

задание на
проектирование

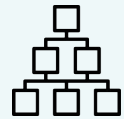
уточнение оператором



декомпозиция и
разбивка текста на
условия и требования



обработка таблиц



построение сложных
связей из условий



аналитика морфемного
состава, синонимов/
омонимов с
применением LLM



проверка полноты
необходимой
информации



поиск противоречий
и их устранение:

1. Через связи
2. Вручную



Создание графовой базы данных



выгрузка каталога
требований

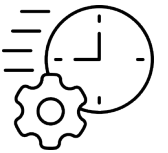


проверка
требования

Эффекты:

Сокращение времени
на рутинные операции

Быстрая обработка
больших массивов
данных



Интерфейс Блока управления требованиями

Проект Сколтех

Блок управления требованиями

Исходные данные

Каталог требований

Требования к объектам

Матрицы

Файлы требований

Выберите файлы

Выбор файлов Отправить Очистить Обработать

Загрузка НТД для обработки с целью наполнения / актуализации каталога требований

Блок управления требованиями

Исходные данные

Каталог требований

Требования к объектам

Матрицы

Список объектов

- Емкость дренажная
- Емкость расходная
- Емкость хранения
- Емкость буферная
- Емкость аварийного слива
- Трансформаторная подстанция
- Электроустановка
- Дизельная электростанция

Выбрать файл Очистить Требования

Вкладка для просмотра требований к объектам на площадке

Блок управления требованиями

Исходные данные

Каталог требований

Требования к объектам

Матрицы

Требования

- 1_минимальное расстояние
- 2_минимальное расстояние
- 3_минимальное расстояние
- 4_минимальное расстояние
- 5_другой
- 6_минимальное расстояние

```
{ "entities": "Объект1:\nНазвание: галерея\nХарактеристика объекта: кабельная,комбинированная\nАтрибут: расстояние\nХарактеристика атрибута: отсутствует\nЧасть объекта: выход,торец\nОтношение к другим объектам: отсутствует", "requirements": "Условие1: Объект1 с частью объекта\ выход\nВид требования: ОбъектN-ограничение-ОбъектN\nМножество ОбъектаM: Объект1 с «часть объекта» выход\nТип требования: ограничение\nКлючевые слова: должны быть\nОднозначное требование: Нет\nНеявное требование: Да\nХарактеристика требования:\n Отношение: между\n Ограничение: не более\n Значение: 150\n Ед.изм: м\n Диапазон: \n Зависимость: ", "n": "1_минимальное расстояние", "text": "6.5.63 Расстояние между выходами в кабельных и комбинированных галереях должны быть не более 150 м, а на эстакадах - не более 300 м. Расстояние от торца эстакад или галерей до выхода не должно превышать 25 м.", "id": "e33b608a-af9c-41fc-b429-e161eaa5c67c2", "doc": "СП 4.13130.2013", "pattern_type": "минимальное расстояние" }
```

6.5.63 Расстояние между выходами в кабельных и комбинированных галереях должны быть не более 150 м, а на эстакадах - не более 300 м. Расстояние от торца эстакад или галерей до выхода не должно превышать 25 м.

Окно для просмотра каталога требований (номер, тип требования, требование в машиночитаемом виде, оригинал текста из НТД)

Демонстратор блока управления требованиями

Исходные данные

Требования

Объекты

Матрицы

Требования

- 1.1
- 1026.0
- 1058.0
- 1085.0
- 1085.1
- 1089.0
- 1090.0
- 1117.0
- 1117.1

```
{ "n": "1085.0", "text": "6.7.32 Внутри группы расстояния в свету между надземными резервуарами должны быть не менее диаметра наибольшего из рядом стоящих резервуаров, а при диаметре резервуаров до 2 м - не менее 2 м.", "суаности": [ "надземные резервуары", "рядом стоящие резервуары" ], "требования": [ { "вид требования": "объект_1 -> отношение -> объект_2", "тип требования": "формула", "источник": "СП_4_13130_2013.docx", "ключевые слова": "должны быть", "вспомогательные слова": "не менее", "объекты требования": { "суаность#1": "суаность#2", "суаность#2": "" }, "условия": [], "характеристики требования": { "отношение": "расстояние", "ограничение": "не менее", "значение": "диаметр наибольшего из рядом стоящих резервуаров",
```

6.7.32 Внутри группы расстояния в свету между надземными резервуарами должны быть не менее диаметра наибольшего из рядом стоящих резервуаров, а при диаметре резервуаров до 2 м - не менее 2 м.

Получить требования Верифицировать требование Разрешить противоречие

Каталог типовых требований Ссылка на графовую БД

Вкладка для верификации требований и разрешения противоречий

Инженерный аудит проектной документации

Инженерный аудит 2D чертежей

Цель проекта

- Сокращение сроков и стоимости проектирования
- Проверка чертежей на соответствие требованиям и определение конкретных элементов на чертеже, где были выявлены нарушения

Требования к итоговым метрикам качества

1. Количество правильных ответов, сгенерированных моделью, не менее 85% от общего количества ответов экспертов по каждому из требований
2. Количество ложных замечаний не более 25% от всего количества замечаний, сгенерированных моделью



Часть чертежа кустовой площадки, отображающая расположение устьев скважин

Сервис автоматизированной проверки чертежей на соответствие требованиям

Проект Сколтех

Предложенное решение

Пайплайн, позволяющий в автоматизированном режиме выполнять проверку чертежей на соответствие 8 типам требований из НТД, которые относятся к 14 типам объектов

Стек технологий

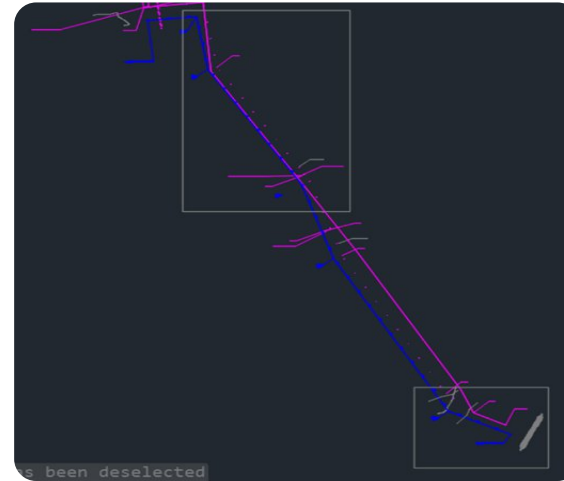
- Мультиязычные LLM модели
- Машинное зрение
- Rule-based алгоритмы

Текущие результаты

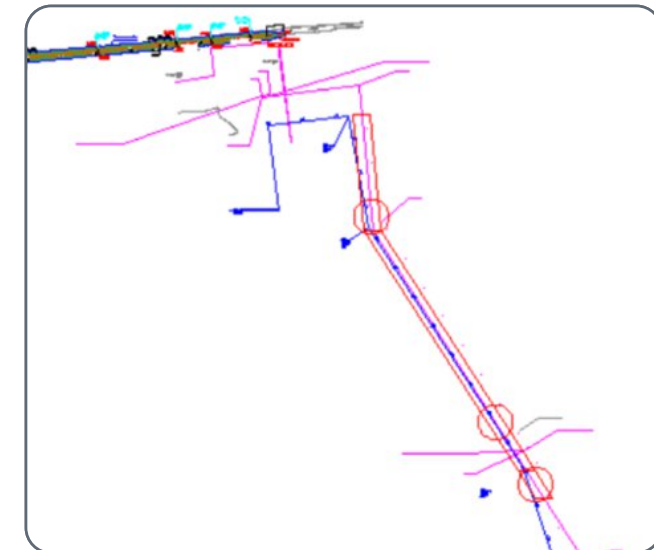
- Пайплайн позволяет в автоматизированном режиме выполнять проверку чертежей на соответствие 8 типам требований из НТД, которые относятся к 14 типов объектов
- На выходе пайплайн генерирует отчет о проверке чертежа с указанием нарушенного требования и локализацией места на чертеже с нарушением для удобства пользователя

Перспективы развития

Масштабирование решения на все проверки из чек-листов



Линейные части трубопровода и ВЛ с зонами нарушений требований, выделенные экспертом (прямоугольники)



Результат проверки чертежа моделью. Красными кружками выделены конкретные места с нарушением требований (минимальное расстояние между ТП и ВЛ не соблюдается)

Skoltech

Сервис проверки классификатора и атрибутов элементов ЦИМ

Проект Сколтех

Задача: проверка корректности классов и атрибутов элементов BIM-модели здания с использованием визуальной информации и окружающего контекста

Особенности

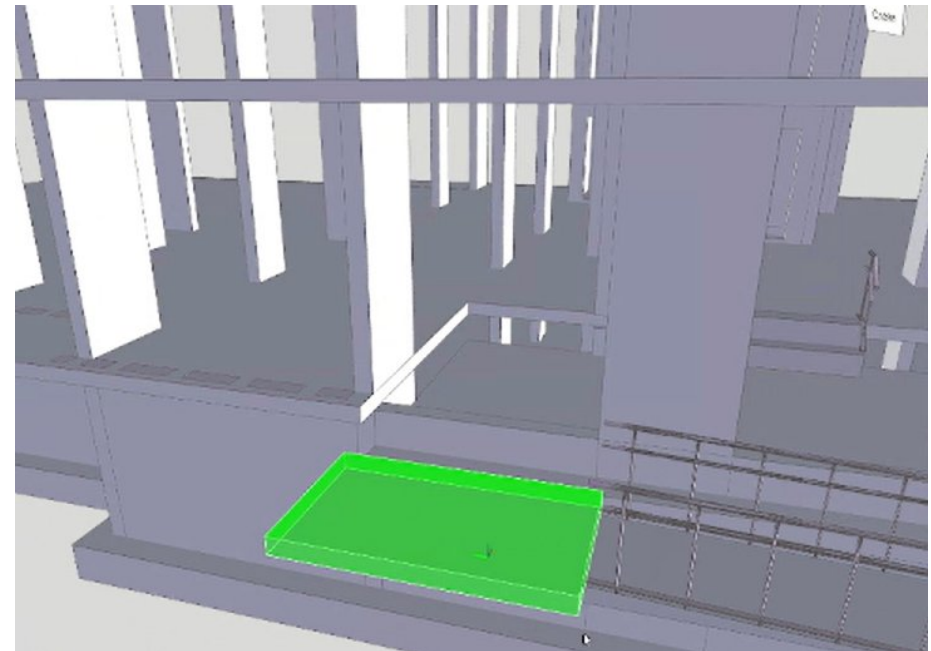
- К разным элементам BIM предъявляются различные нормативные требования
- Многие элементы BIM невозможно отличить без контекста
- Ручная проверка классификации затруднительна

Предложенное решение

Сервис на основе ИИ для автоматизированной проверки классификатора и атрибутов элементов BIM с учетом контекста

Ожидаемые эффекты

- Снижение стоимости и времени проектирования
- Снижение рисков и «стоимости» ошибок на этапе проектирования
- Повышение качества проектных решений



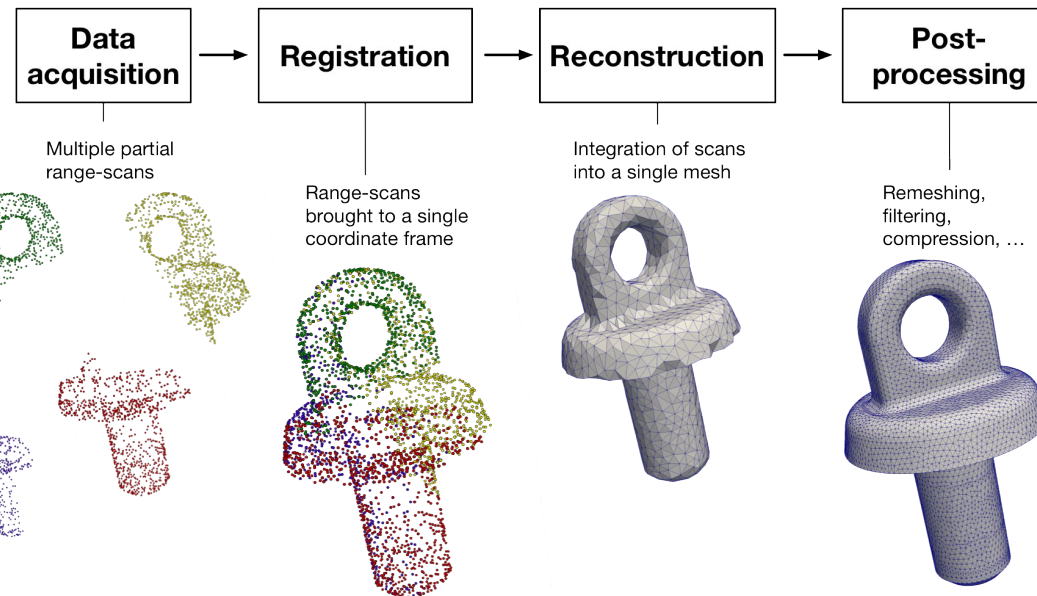
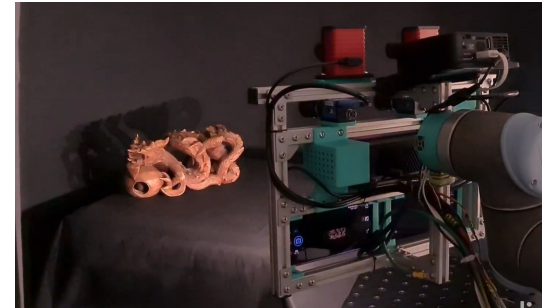
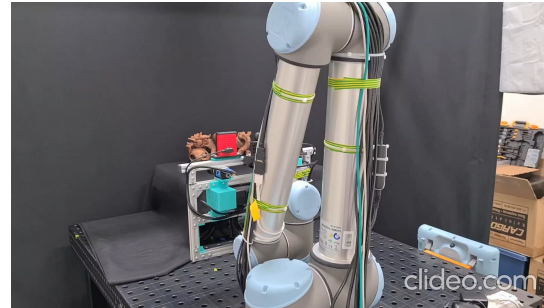
Элемент фундаментной плиты классифицирован как «перекрытие». В результате неверно применены требования по гидроизоляции, классу бетона, морозостойкости

ИИ в задачах реверс-инжиниринга

Создание 3D-моделей объектов со сложными геометрическими формами

Проект Сколтеха

- 6 RGB и 4 камеры глубины
- 14 условий освещения
- Референсные 3D сканы с субмиллиметровой точностью
- 107 сцен
- 1,4 млн изображений



Multi-sensor large-scale dataset for multi-view 3D reconstruction

Датасет Skoltech3D - лучший для трехмерной реконструкции изображений – см. отчет AI Index Report 2024 от стэнфордского центра Institute for Human-Centered AI (Stanford HAI)

JUNE 18-22, 2023
CVPR
VANCOUVER, CANADA

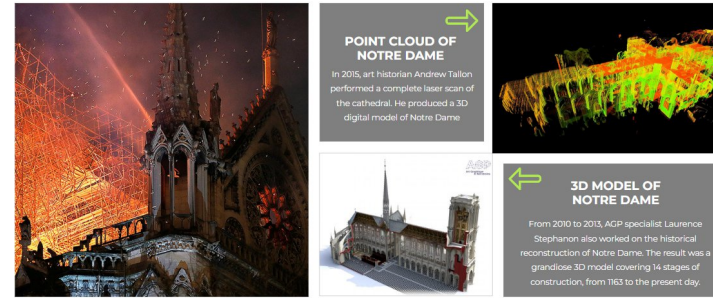
Skoltech

Создание 3D-модели с. Василия Блаженного

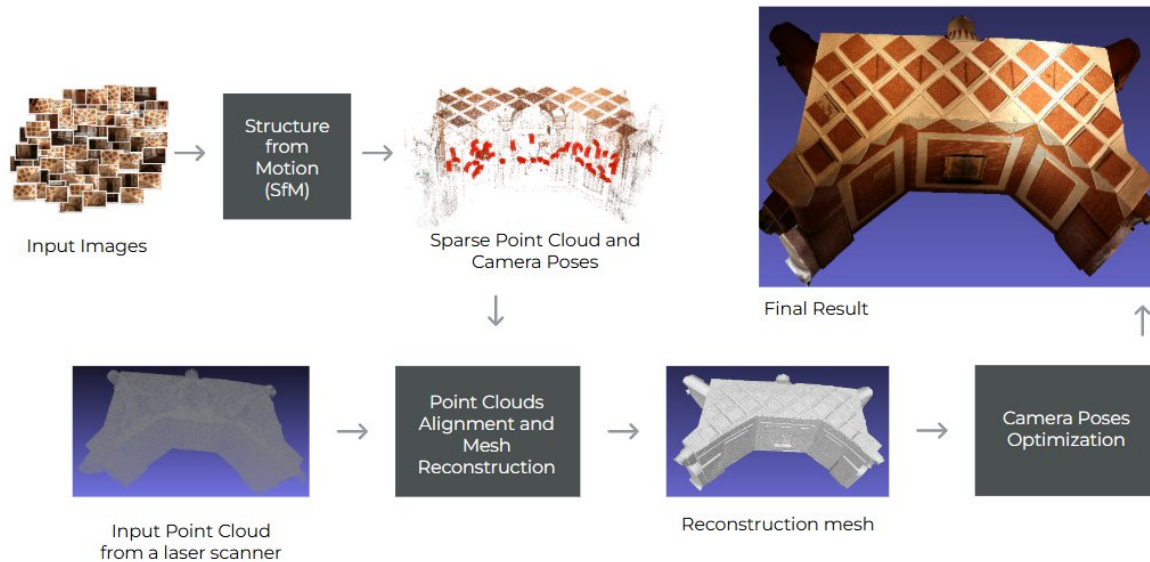
Проект Сколтеха

Ключевые вызовы

- Повторяющиеся узоры
- Отражения или прозрачные элементы
- Неравномерное освещение
- Высокая детализация элементов декора



Пример: реконструкция собора Нотр-Дам оказалась возможной благодаря ранее созданной 3D-модели



Наш пайплайн



Результат: от фото и облака точек до 3D-модели собора

Инженерный ИИ в машиностроении



Прототип пайплайна для трассировки коммуникаций изделий

Проект Сколтех

Задача: автоматизированная трассировка коммуникаций различных систем (трубопроводы гидравлических систем, электрические кабели, слаботочка) комплексных изделий и подбор креплений с учетом задачи минимизации стоимости

Особенности

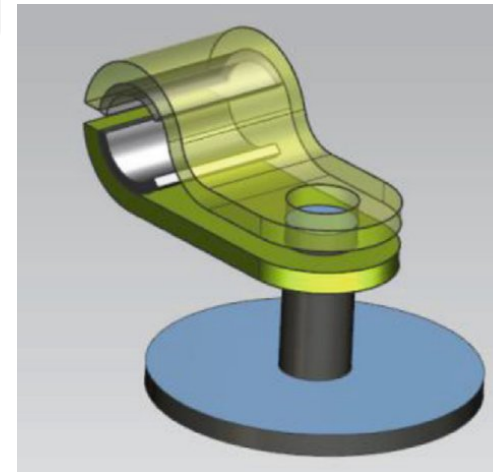
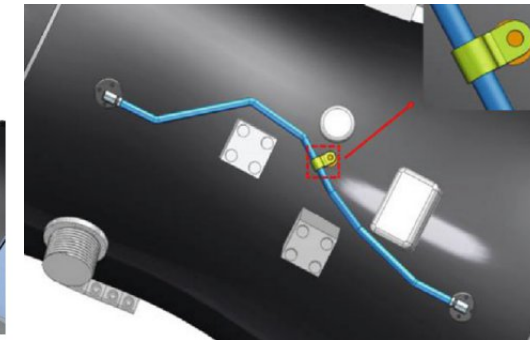
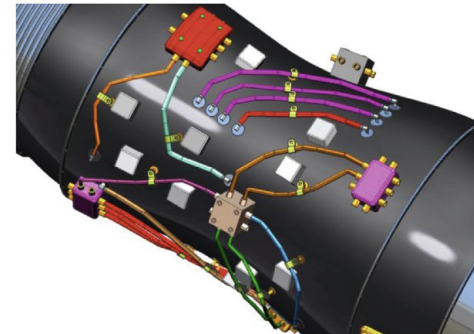
- Необходимо учитывать требования к технологичности (например, удобный доступ для обслуживания)
- Нельзя допускать коллизии между элементами и нарушение требований к минимальным расстояниям (например, между горячей и холодной трассой флюидов)
- Необходимо размещать крепления и соединительные узлы (например, тройники) без нарушения требований к длине прямых участков

Предложенное решение

Прототип пайплайна на основе графов, интегрированный с САПР, для автоматизированной трассировки коммуникаций, подбора и размещения креплений с учетом задачи минимизации стоимости системы и ограничений

Ожидаемые эффекты

- Снижение стоимости и времени проектирования систем коммуникаций
- Достижение более оптимальных проектных решений
- Повышение качества изделий



Пример: решение задачи трассировки коммуникаций и размещения креплений различных систем ГТУ

Research Article
Integrated Optimization of Pipe Routing and Clamp Layout for
Aeroengine Using Improved MOALO

Skoltech

Наши фундаментальные результаты

Избранные публикации на ведущих международных А* конференциях по ИИ (2021-2024)

1. Korotin, A., Egiazarian, V., Asadulaev, A., Safin, A., & Burnaev, E. (2020, October). Wasserstein-2 Generative Networks. **ICLR 2021**.
2. Korotin, A., Li, L., Solomon, J., & Burnaev, E. (2020, October). Continuous Wasserstein-2 Barycenter Estimation without Minimax Optimization. In **ICLR 2021**
3. Mokrov, P., Korotin, A., Li, L., Genevay, A., Solomon, J. M., & Burnaev, E. (2021). Large-scale wasserstein gradient flows. **NeurIPS 2021**
4. Korotin, A., Li, L., Genevay, A., Solomon, J. M., Filippov, A., & Burnaev, E. (2021). Do neural optimal transport solvers work? a continuous wasserstein-2 benchmark. **NeurIPS 2021**
5. Rout, L., Korotin, A., & Burnaev, E. (2021, October). Generative Modeling with Optimal Transport Maps. **ICLR 2022**
6. Korotin, A., Egiazarian, V., Li, L., & Burnaev, E. (2022). Wasserstein iterative networks for barycenter estimation. **NeurIPS 2022**
7. Korotin, A., Kolesov, A., & Burnaev, E. (2022). Kantorovich strikes back! Wasserstein GANs are not optimal transport?. **NeurIPS 2022**
8. **Korotin, A., Selikhanovych, D., & Burnaev, E. (2023). Neural Optimal Transport. ICLR 2023**
9. Korotin, A., Selikhanovych, D., & Burnaev, E. (2023). Kernel neural optimal transport. **ICLR 2023**
10. Gazdieva, M., Korotin, A., Selikhanovych, D., & Burnaev, E. (2023). Extremal Domain Translation with Neural Optimal Transport. **NeurIPS 2023**
11. Gushchin, N., Kolesov, A., Mokrov, P., Karpikova, P., Spiridonov, A., Burnaev, E., & Korotin, A. (2023). Building the Bridge of Schrödinger: A Continuous Entropic Optimal Transport Benchmark. **NeurIPS 2023**
12. **Gushchin, N., Kolesov, A., Korotin, A., Vetrov, D., & Burnaev, E. (2022). Entropic neural optimal transport via diffusion processes. NeurIPS 2023**
13. Mokrov, P., Korotin, A., Kolesov, A., Gushchin, N. & Burnaev, E. Energy-guided Entropic Neural Optimal Transport. **ICLR 2024**
14. Korotin, A., Gushchin, N. & Burnaev, E. Light Schrödinger Bridge. **ICLR 2024**
15. Asadulaev, A., Korotin, A., Egiazarian V., Mokrov, P. & Burnaev, E. Neural Optimal Transport with General Cost functionals. **ICLR 2024**
16. Gushchin, N., Kholkin, S., Burnaev, E., & Korotin, A. (2024). Light and Optimal Schrödinger Bridge Matching. In Forty-first International Conference on Machine Learning., **ICML 2024**
17. Kolesov, A., Mokrov, P., Udovichenko, I., Gazdieva, M., Pammer, G., Burnaev, E., & Korotin, A. Estimating Barycenters of Distributions with Neural Optimal Transport. In Forty-first International Conference on Machine Learning. **ICML 2024**



→ **SPOTLIGHT**, т.е. статья
попала в **ТОП 25%**
ICLR 2023;

→ **ORAL**, т.е. статья попала
в **ТОП 3% NeurIPS 2023**;
единственная статья в топе
с авторами только из
России!



Спасибо!